

# Esitutkimus lasijauheen hiukkaskoon ja -muodon merkityksestä 3D-tulostamisessa

Tuuli Saarelainen

Muotoilun laitos

Taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu

Aalto-yliopisto

4/2015

## Sisältö

1. Johdanto	4
2. 3D-tulostaminen	5
3. Pâte de verre ja uunivalutekniikka	5
3.1. Pâte de verre – muotti	6
4. Materiaalit	7
5. Menetelmät	7
5.1. Koevalmistelut	8
6. Koetulokset	11
6.1. Polttolämpö 750 °C	11
6.2. Polttolämpö 850 °C	13
6.3. Polttolämpö 800 °C	14
7. Johtopäätökset	16

## Lähteet

Liitteet: 1a-c

## Tiivistelmä

-

Esitutkimus lasijauheen hiukkaskoon ja -muodon merkityksestä 3D-tulostamisessa

Tutkimus käsitteli hiukkaskoon ja – muodon merkitystä lasin materiaalia lisäävässä valmistuksessa, ts. 3D-tulostamisessa. Työn päätarkoituksena oli tutkia, kuinka partikkelikooltaan ja – muodoltaan erilaiset lasimateriaalit reagoivat 750–850 celsiusasteen lämpötiloissa. Tarkasteltavia seikkoja olivat mm. tulostuslaatu ja sintraantuminen. Sananmukaista 3D-tulostusta ei suoritettu tutkimuksen aikana, vaan koekappaleita simuloitiin analogisin keinoin.

Tutkimus toteutettiin kvalitatiivisin menetelmin tehden kolme sintrauspolttokoetta 50 °C:een vaihteluvälillä. Jatkotutkimusta ajatellen tietoa materiaalien käyttäytymisestä saatiin kerättyä riittävästi. Tärkeimpänä tuloksena voitiin pitää  $<0,2$  -  $<0,5$ mm särmikkään lasimurskan laadullisten ominaisuuksien soveltuvuuden todentamista.

Avainsanat: 3D-tulostus, pâte de verre, lasijauhe, sintraantuminen.

## 1. Johdanto

Lasimateriaalien kanssa työskentely on perinteisesti muodostunut vahvalle käsityötaidon erityisosaamiselle. Tekniikan kehittyessä ja tullessa helpommin saavutettavaksi perinteiset taidot saavat kirjaimellisesti uusia ulottuvuuksia esimerkiksi 3D-tulostamisen myötä.

Käsillä oleva materiaalitutkimus käsittelee lasijauheen koon ja muodon vaikutusta lasin kolmiulotteisessa tulostamisessa. Tutkimuksen tässä vaiheessa keskitytään hahmottamaan, millainen merkitys lasijauheen hiukkaskoolla tai muodolla on tulostuslaatuun ja lasimassan sintraantumisominaisuuksiin nähden. Tutkimus on esityötä myöhempää, tarkentavaa selvitystä varten. Esitutkimuksen aikana sananmukaista 3D-tulostamista ei tehdä, vaan kokeet suoritetaan simuloimalla mallikappaleita analogisin keinoin. Myöhemmässä vaiheessa on tarkoitus selvittää tulosten yhteensopivuus Aalto-yliopiston Otaniemessä ADD-labissa sijaitsevan 3D-tulostimen kanssa. Tällä hetkellä tulostin on asennettu keraamisen jauheen tulostusta varten.

Raportissa käsitellään paitsi käytännön työvaiheita tutkimuksen edetessä, myös teoriaa 3D-tulostamisesta, ts. materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja pâte de verre – tekniikasta, jonka ulkonäkö ja valmistusmenetelmät ovat verrattavissa jo olemassa oleviin 3D-tulostettuihin lasiesineisiin.

Koemateriaalit ovat erityyppisiä ja -kokoisia lasikuulia ja lasimurskia. Rakenteeltaan lasikuulat ovat pyöreitä ja murska särmikästä. Lähtökohtaisesti lasimurskan oletetaan muodostavan kirkkaamman lopputuloksen, sillä lasikuulat ovat ensisijaisesti tarkoitettu hiekkapuhallusta varten ja saattavat käyttötarkoituksestaan johtuen sisältää enemmän epäpuhtauksia (mm. rautaoksidia) kuin lasiesinevalmistukseen tarkoitettu lasimurska. Ennakko-oletuksena voidaan pitää myös suurempirakeisen lasimurskan muodostavan kirkkaampaa ja paremmin sintraantunutta lasia.

Lasijauhetutkimuksen rinnalla tutkitaan sintrauspoltossa käytettävän tukiaineen ominaisuuksia. Työvaiheet on suoritettu yhteistyössä muotoilun pääaineen opiskelijan Lara Jasimin kanssa ja yhteisistä koekappaleista on tarkasteltu kumpaankin tutkimukseen soveltuvia seikkoja. Molemmista tutkimuksista kirjoitetaan erilliset raportit<sup>1</sup>. Tutkimustuloksia kannattaa vertailla keskenään paremman kokonaiskuvan saavuttamiseksi.

---

<sup>1</sup> Jasim, Lara: Esitutkimus polttotukiaineista 3D-lasitulosteen sintrauksessa. Materiaalitutkimusraportti 2015.

## 2. 3D-tulostaminen

3D-tulostus on puhekieleen yleistymässä oleva termi materiaalia lisäävästä valmistuksesta. Muita yleisesti käytettyjä termejä ovat AM-tekniikka, Additive Manufacturing (AM) ja 3D printing. FIRPA, Finnish Rapid Prototyping Association suosittelee käytettäväksi termiä ”materiaalia lisäävä valmistus”. Termillä tarkoitetaan erilaisia valmistusmetodeja, kuten stereolitografia, lasersintraus ja materiaalin pursotus. 3D printing – termiä käytettäessä usein viitataan kahteen valmistuksen alaryhmään; sideaineen suihkutusta ja/tai materiaalin suihkutusta (binder jetting/material jetting). AM, additive manufacturing, on terminä tulossa kansainvälisiin standardeihin.<sup>2</sup>

3D-tulostus käyttää hyväkseen teknologiaa, jossa CAD-mallinnus saa kolmiulotteisen, fyysisen muodon. Laite tulostaa CAD-ohjelmalla luodusta stl-tiedostosta (surface tessellation language) siihen sovitetulla materiaalilla (esim. muovi, metalli, keraamiset jauheet) kerros kerrokselta halutun kappaleen. Laite esimerkiksi suihkuttaa ohuen kerroksen sideainetta, jonka jälkeen materiaali jauhetta suihkutetaan sideaineen päälle. Näin kappaletta voidaan käsitellä tulostuksen jälkeen. Lopuksi esine sintrataan, jolloin sideaine palaa pois jättäen jäljelle pelkän lasimateriaalin. 3D-tulostamisen etuna on prosessin nopeus sekä geometrisesti vaikeiden muotojen tuottaminen.<sup>3</sup>

## 3. Pâte de Verre ja uunivalutekniikka

Lasin uunitekniikat voidaan jakaa muutamiiin päämenetelmiin, kuten muottiin sulatukseen, pâte de verre ja erilaisiin levynmuokkaustekniikoihin. Uunitekniikka nimenäkin viittaa siihen, että esine valmistetaan keramiikkauunin tyyppisessä kaas- tai sähköuunissa 540–900 Celsiusasteessa<sup>4</sup>.

Lähes mikä tahansa lasi sopii uunivalutekniikkaan murskakoostaan huolimatta. Lasi voi olla jauhetta, murskaa, granulaattia tai sitä voidaan hyödyntää levynä.<sup>5</sup> Muotti täytetään lasimurskalla tai lasikappaleilla ja poltetaan uunissa lasin sintraamiseksi eli kiinteyttämiseksi. Esineen muoto määräytyy muotin mukaan. Muottiin kosketuksessa ollut puoli on himmeämpi kuin paljaana ollut puoli. Pintaa voidaan esimerkiksi kiillottaa esineen kestävyuden sen salliessa.

---

<sup>2</sup> <http://firpa.fi/html/sanasto.html>

<sup>3</sup> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221910002086>,  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.200800179/abstract>,  
<http://www.shapeways.com/blog/archives/401-you-can-now-3D-print-in-glass-with-Shapeways.html>

<sup>4</sup> Kekäläinen 1992, 21.

<sup>5</sup> Fenton&Kervin 2000, 25.

Pâte de verre-tekniikan erottaa muista uunivalutekniikoista mm. se, ettei lasimassaa yleensä sintrata kirkkaaksi. Valmiin lasin karkeus ja ohuus ovat tyypillisiä ominaisuuksia kyseiselle tekniikalle. Merkittävä ero on myös valmistuksessa käytettävät polttolämpötilat: ohuiden esineiden sintraamiseen tarvitaan matalampi lämpötila, jolloin kappaleet eivät sulaessaan valahda muotin pohjalle. Usein pâte de verrestä käytetäänkin nimeä ”ohutseinämatekniikka”. Ranskankielinen termi ’pâte de verre’ tarkoittaa lasitahnaa ja käännös kuvaa hyvin materiaalia sen raakavaiheessa. Lasimurska on usein niin hienoa, että se muodostaa veden kanssa sekoitettuna tahnamaisen massan.<sup>6</sup>

Raekoko, käytetty lämpötila ja haudutuksen kesto vaikuttavat lasin kirkkauteen valmiissa esineessä<sup>7</sup>. Korkeampi lämpötila ja pidempikestoinen poltto-ohjelma edesauttavat ilman poistumista luoden kirkkaamman massan<sup>8</sup>. Materiaalin raekoko vaikuttaa myös massan kutistumaan: mitä suurempi rae, sitä enemmän valmistettava esine pienenee rakeiden väliin jääneen ilman poistuessa. Tällöin muottiin saatetaan joutua lisäämään raaka-ainetta kesken polton. Tilavuus pienenee noin 30 % massan sintraantuessa<sup>9</sup>.

### 3.1. Pâte de verre – muotti

Pâte de verre – muotti joutuu kovalle rasitukselle polton aikana. Muotit ovat monesti kertakäyttöisiä, sillä ne haurastuvat polton aikana vapautuvan höyryn<sup>10</sup> takia ja usein esineiden muoto edellyttää muotin särkemistä esineen ulos saamiseksi. Valmistettavan esineen koko ja valittu pâte de verre – menetelmä vaikuttavat muotin materiaalikoostumukseen. Uunivaluissa käytettävät muotit valmistetaan yleensä korkeita lämpötiloja sietävistä kipsiseoksista ja vahvistetaan vielä esimerkiksi lasikuidulla. Suuri kappale vaatii lujan ja tukevan muotin, kun taas hauras ja ohutseinäinen kappale tarvitsee pehmeämmän ja imukykyisen muotin. Jos hauraan esineen muotti on liian kova, saattaa se rikkoa esineen muottia poistettaessa. Toisaalta taas, jos painavatekoinen esine laitetaan liian hauraaseen muottiin, riskinä on muotin rikkoutuminen jo polton aikana ja lasin valuminen muotista ulos pilaten sekä esineen että mahdollisesti myös uunin. Mitä korkeammassa lämpötilassa lasia sintrataan, sitä kovemmalle rasitukselle muotti joutuu.<sup>11</sup>

---

<sup>6</sup> Kekäläinen 1992, 25.

<sup>7</sup> Kekäläinen 1992, 24.

<sup>8</sup> Kirsti Taiviolan opetusmateriaali, 2015

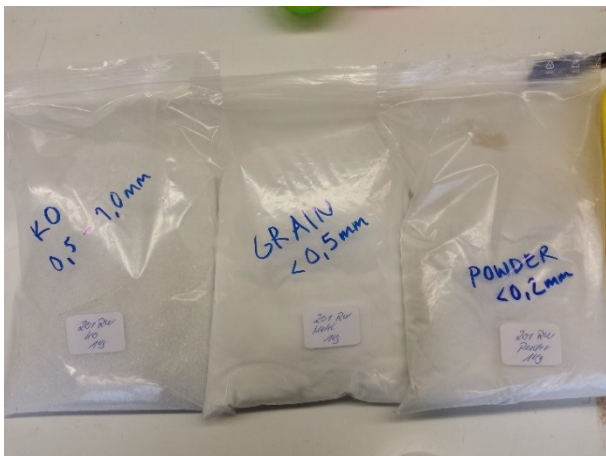
<sup>9</sup> Kekäläinen 1992, 29.

<sup>10</sup> Fenton&Kervin 2000, 88.

<sup>11</sup> Kekäläinen 1992, 29.

#### 4. Materiaalit ja tutkimusasettelu

Tutkimusmateriaalit tilattiin Aalto-yliopiston Taiteen ja suunnittelun korkeakoulun lehtori Kirsti Taiviolan toimesta saksalaiselta Farbglasshütte Reichenbach GmbH – yritykseltä sekä Nestori-tuote Oy:ltä Järvenpäästä. Tarpeelliseksi katsottiin, että tutkimuksen tässä vaiheessa riittävä määrä vertailtavissa olevia koemateriaaleja olisi muutama erilainen pyöreä lasikuula ja yhtä monta erilaista lasimurskaa. Materiaaleina käytettiin hiekkapuhallukseen tarkoitettua pyöreätä (AH 040-070 ja AD 100-200) lasikuulaa, jonka partikkelikoko oli 0,04-0,07mm sekä 0,1-0,2mm. Tämän lisäksi käytettiin 201 RW crystal leadfree <0,2mm jauhetta ja <0,5mm lasimurskaa (kuva 1). Tukiaineina tutkittiin wollastoniittia, kvartsia, alumiinioksidia sekä hienojakoista (0,2mm) samottia. Näin ollen materiaalit 4x4 muodostivat yhteensä 16 koekappaletta kutakin polttoa kohden. Koekappaleita päätettiin sintrata neljässä eri lämpötilassa riittävän vertailuarvon saamiseksi, mutta myöhemmin koepolttoja supistettiin kolmeen aikataulun haasteellisuuden vuoksi. Valitut lämpötila-alueet rajattiin 750–850 °C vaihteluvälillä 50 °C.



Kuva 1: lasimurskapsusjeja (kuva: Lara Jasim)

#### 5. Menetelmät

Kokeiden suunnitteluvaiheessa kävimme vierailemassa Aalto-yliopiston Otaniemessä sijaitsevassa ADDlabissa (Aalto University Digital Design lab). Tavoitteena oli päästä tekemään lasintulostuskokeita ZCorp – tyyppisellä 3D Systems’in jauhetulostimella. Vierailun yhteydessä kävi kuitenkin ilmi, että laitetta oltiin vasta asentamassa ja että ADDlabin oma tutkimusryhmä halusi varmistaa laitteen toimivuuden aiemmin testaamallaan keraamisella jauheella ennen kokeiluja uudella materiaalilla.

Tutkimustavoitteena oli tähän saakka pidetty nimenomaan 3D-tulostukseen sopivan materiaalin löytämistä ja sen käyttäytymisen tutkimista, mutta resurssien vähäisyyden takia tutkimusongelma jouduttiin rajaamaan uudelleen koskemaan esitutkimusta lasin raekoon käyttäytymisestä ja tukiaineen merkityksestä sintrauspolton aikana. Tutkimuksen suunnitteluvaiheessa koekappaleeksi hahmoteltiin H-kirjaimen mallista muotoa, jossa silta yhdistäisi kaksi kappaleen osaa. Osa koekappaleesta olisi orgaanisempi ja toinen osa taas geometrisempi ja särmikkäämpi. Monipuolinen koekappale antaisi paljon informaatiota sekä tukiaineiden että lasin käyttäytymisestä. 3D-tulostimen puuttumisen takia koekappale jouduttiin suunnittelemaan kuitenkin uudestaan ja muodoksi valittiin tasainen levymainen muoto, joka saatiin silikonimuottiin prässäämällä. Koekappaleeseen tehtäisi reikä, jonka avulla voisi havainnoida tukiaineen vaikutusta ja myös massan käyttäytymistä eri lämpötiloissa sintratessa.

### 5.1. Koevalmistelut

Sintrauspolttua varten tarvittiin polttoastiat, ts. tukimuotit, joiden sisään 3D-tulostusnäytteet voitaisi asettaa tukiaineen kanssa. Tukimuotit valmistettiin Raija Siikamäen reseptin mukaan (taulukko 1). Tukimuotteja varten oli ensin valmistettava mallineet, jonka avulla kipsinen valumuotti saatiin aikaiseksi. Tämän jälkeen valumuotit kuivatettiin ja tukimuotit saatettiin valaa ja raakapolttaa. Raakapolttolämpötilaksi asetettiin 950 °C, jotta tukimuotit kestäisivät varmemmin suunnitellun max. 850 °C sintrauslämpötilan.

Taulukko 1: Tukimuottiin käytetty upokasvalusavi (Raija Siikamäen reseptin mukaan)

Kaoliini (super standard porcelain)	40 %
Alumiinioksidi	35 %
Maasälpä	25 %
Yht.	100 %
+Deflokkulantti	0,25 %
+vettä (raaka-aineiden kuivapainosta)	40 %

Simuloidaksemme kolmiulotteista tulostusta analogisesti lasijauheen siivilöitymistä testattiin. Tarkoituksena oli, että sidosainetta siivilöitäisi kerroksittain lasijauheen kanssa saadaksemme aikaan 3D-tulostusta vastaavan kappaleen. Raekooltaan 0,04-0,07mm jauhe meni läpi hienoimmasta siivilästä



keoksi hulahtaen, joten ajatus siivilöinnistä jouduttiin hylkäämään. Ohuen jauhekerroksen päälle sprayliimalla suihkuttaminen osoittautui myös vaikeaksi, sillä sprayn ponnekaasu sai kevyen lasijauheen pölähtämään ilmaan ja liima paakkuuntui lopun lasijauheen kanssa kosketuksiin päästyään.

Oikean liima-aineen tutkimiselle ei ollut aikaa, joten mm. CMC:n, dekstriinin, arabikumin, viinikumin, sokerin ja maissitärkkelyksen soveltuvuutta arvioitiin ARTS:n keramiikan harjoitusmestari Tomi Pelkosen ja lehtori Taiviolan kanssa. Muutamaa todennäköisintä ja keramiikassa käytetyintä liimaa (CMC ja dekstriini) testattiin kolmella eripitoisella (1, 2 ja 3 %) liuoksella lasimurskan kanssa (kuva 2). Nämä seokset prässättiin silikonimuottiin, kuivattiin ja kappaleiden työstötuntuma ja kuivalujuus arvioitiin analogisin keinoin. Paras tulos saavutettiin käyttämällä CMC-lasiteliimaa 1 % sekoitussuhteella.



Kuva 2: CMC - ja dekstriiniseokset silikonimuotissa (kuva: Lara Jasim)

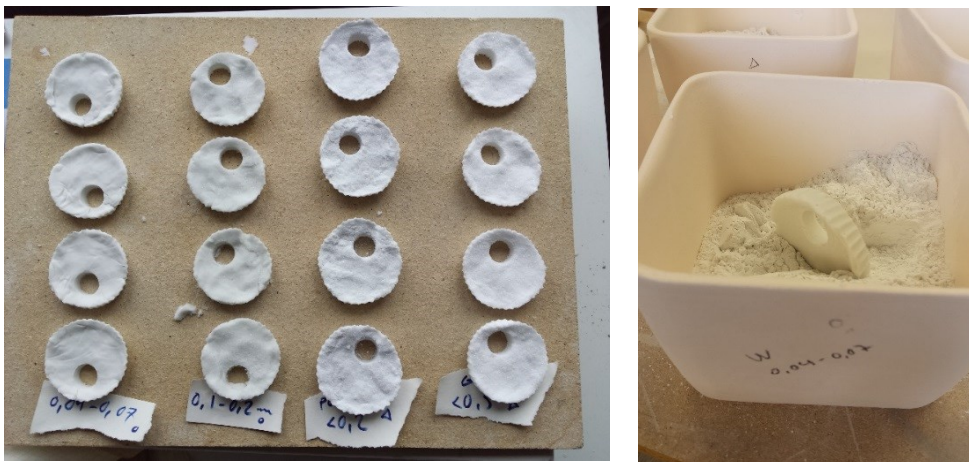
Valitun liima-aineen sekoittaminen lasijauheeseen ja – murskaan havaittiin toimivan parhaiten siten, että CMC:hen sekoitettiin ensin 25 % raaka-aineiden kuivapainosta vettä (taulukko 2), jonka jälkeen liisterimäinen neste sekoitettiin kunkin kuiva-aineen kanssa tasaiseksi tahnaksi.

Taulukko 2: Lasitahnaresepti (Saarelainen & Jasim)

Lasimurska / -jauhe	100 %
CMC	1 %
Vettä (kuivapainosta)	25 %

Tämän jälkeen tahna oli mahdollista prässätä tiivistä muottiin. Koekappaleista haluttiin saada selville erivahvuisten seinämien käyttäytyminen polton aikana, joten massaan rei'itettiin aukko ilmentämään ainelujuuden vaihtelua (kuva 3). Reiän pyöreästä näkee myös selvästi, mikäli muoto vääntyy ja tukiaine ei näin ollen ole riittävä kannattelemaan sulavaa massaa.

Koekappaleet aseteltiin tukimuotteihin siten, että pohjalle laitettiin tukiainetta, jonka varaan koekappale varovasti painettiin seisomaan pystyasentoon reikä yläpuolelle (kuva 4). Kappaleen päälle ripoteltiin lisää tukiainetta noin peittäen se noin 10mm syvyyteen pinnasta. Lopuksi tukimuottia tärisytettiin varoen muuttamasta koekappaleen asentoa tukiaineen sisällä niin, että mahdolliset tyhjiöt täyttyisivät tukiaineella painumatta liian tiiviisti koekappaleen ympärille.



Kuvat 3 ja 4: Koekappaleita ja tukiainetta (kuva: Lara Jasim)

## 6. Koetulokset

Koepoltot suoritettiin noin 3-4 päivän sykleissä noin viikon aikana. Poltto-ohjelmat (liite 1) laati lehtori Taiviola. Jokainen poltto-ohjelma oli lämpötilaltaan erilainen, mutta noudatti samaa kaavaa, jossa nosto- ja jäähdytyslämpö etenivät yhtäläisellä nopeudella. Kokeet suoritettiin siten, että alhaisin lämpötila, 750 °C, poltettiin ensimmäisenä, maksimilämpötila, 850 °C, käynnistettiin viikonloppua vasten sen vaatiman pidemmän jäähtymisajan vuoksi ja keskilämpötila 800 °C poltettiin viimeisenä.

### 6.1. Polttolämpö 750 °C

Silmämääräisesti tarkasteltaessa kappaleet vaikuttivat huonosti sintraantuneilta ja pinnan rakenne oli sokerimainen (kuva 5). Suuremman raekoon (powder <0,2mm ja grain <0,5mm) koekappaleista irtosi koskettaessa muruja. Kaikki koekappaleet olivat opaaleja eikä kiiltäväksi sulamista ollut tapahtunut. Koekappaleet pestiin vedessä kevyesti siveltimellä ylimääräisen tukiaineen poistamiseksi niiden pinnasta. Pesun aikana huomattiin, että erityisesti hienomman raekoon (0,04mm-0,07mm ja 0,1-0,2mm) koekappaleet olivat merkittävän huokoisia ja imivät vettä.

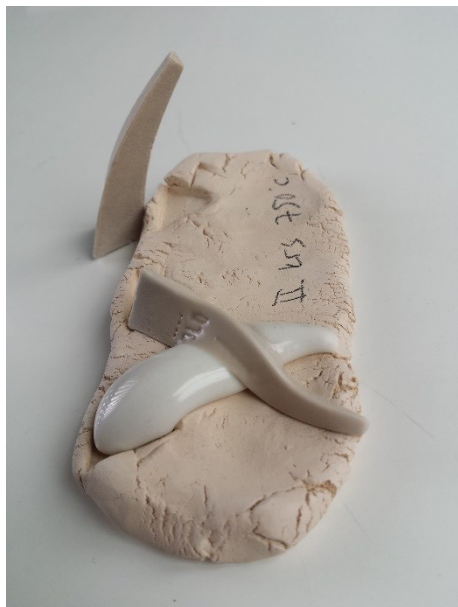


Kuva 5: Koekappaleet 750 °C (kuva: Lara Jasim)

Ensimmäisen koesarjan valmistuksessa massa pääsi kuivumaan liikaa ennen rei'ittämistä, jonka takia massa ei antanut periksi rei'ityksestä aiheutuvalle rasitukselle ja osaan kuivuneita koekappaleita oli ilmestynyt pieniä halkeamia. Uunin ylemmässä (2. krs.) olleet samotti <0,2mm, alumiinioksidi <0,2mm, kvartsi <0,5mm ja wollastoniitti <0,5mm – kappaleet olivat menettäneet reiän pyöreyyttä.

Alemmassa (1. krs.) kerroksessa koekappaleet olivat säilyttäneet muotonsa hyvin, mutta kuten yllä mainittiin, sintraantuminen oli jäänyt vähäiseksi. Polttoon käytettiin keilanumeroita 015a, 016 ja 017 (kuva 6). Keila nro. 017 oli taipunut hiukan ja oli uunista otettaessa irtonainen polttotuesta. Numerot

016 ja 015a olivat kaatuneet ja sulaneet ristikkäin. Tarkkaa lämpötilaa oli hankala nähdä kaatumisen takia, mutta keilojen sulamiseroista päätellen ja erityisesti keilan nro. 017 pienestä taipumisesta johtuen voitiin päätellä lämpötilan olleen uunin 2. kerroksen keskikohdassa suunnilleen halutussa 750 °C:ssa.

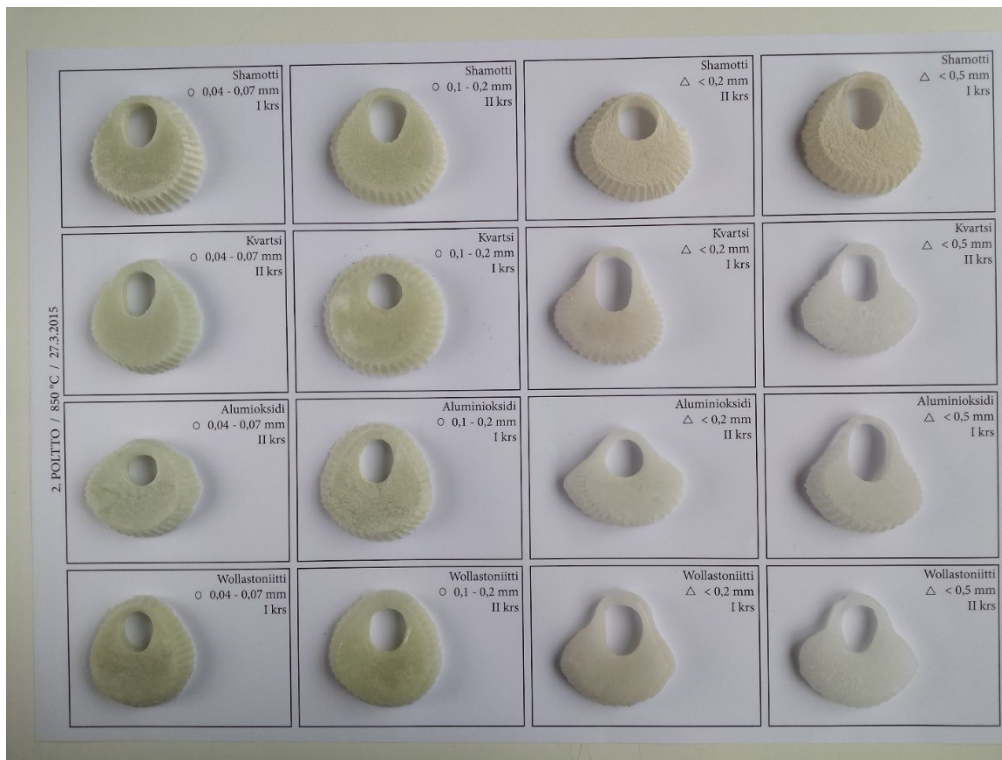


Kuva 6: Keilat 015a, 016 ja 017 (kuva: Lara Jasim)

## 6.2. Polttolämpö 850 °C

Erot ylimmän ja alimman polttolämpötilan välillä olivat selvät: suurin osa koekappaleista oli sintraantunut kauttaaltaan ja menettänyt alkuperäistä muotoaan. Tukiaine oli pitänyt reiän ylemmän kaaren kohtalaisen muuttumattomana, mutta massa oli selvästi sulanut ja valunut alaspäin jättäen ikään kuin hartialinjan (kuva 7). Myös erot särmikkäiden (kuvataan kolmiolla kuvissa 6, 7 ja 9) ja kuulamaisten (kuvataan ympyrällä) koemateriaalien välillä olivat selkeät. Särmikkästä lasimurskasta prässätyt koekappaleet olivat huomattavasti lasimaisempia (joskin opaaleita) ja epämuodostuneita. Massojen värierot tulivat selkeämmin esiin korkealle poltettaessa. Vihreä väri lasikuulakappaleissa johtuu oletettavasti rautaoksidin vaikutuksesta<sup>12</sup>. Lasikuulamateriaalia ei ole tarve puhdistaa epäpuhtauksista sen käyttötarkoituksen (hiekkapuhallus) vuoksi.

<sup>12</sup> Kirsti Taivolan opetusmateriaali, 2015.



Kuva 7: Koekappaleet 850 °C (kuva: Lara Jasim)

Koekappaleissa oli selvästi havaittavissa eri tukiaineiden vaikutus pinnan laatuun. Esimerkiksi samotti oli näyttänyt jäävän kiinni jokaiseen koekappaleeseen, kun taas wollastoniitissa olleet koekappaleet olivat saaneet lasimaista kiiltoa pintaansa eikä tukiainejäämiä ollut merkittävästi. Huomattavaa ylimmän lämpötila-alueen koekappaleissa oli erityisesti samottisarjan <0,2mm ja <0,5mm pinnan ryppyisyys. Myös kvartsisarjassa oli havaittavissa samaa, joskin vähemmän.

Kvartsitukiaineessa ollut <0,2mm koekappale näytti harmaalta muihin kappaleisiin verrattuna, mutta tutkimuksen tässä vaiheessa johtopäätöksiä väriin johtaneista syistä on mahdotonta esittää. Osasyynä saattaa olla esimerkiksi savu, jota muodostuu mm. liima-aineen pois palaessa. Hypoteesin testaamiseksi ja varmistamiseksi tarvittaisi kuitenkin useampi toisto.

Sarjassa poikkeavimman näköinen kappale oli wollastoniitissa ollut 0,1-02mm raekoon koepala. Sen pinta oli jäänyt huurrettun oloiseksi. Tarkemmin katsottaessa kappaleen rakenne näytti kerroksittaiselta ja massan sedimentoitumista epäiltiin.

Käytetyt polttokeilat olivat nro:t 013a ja 012a. Sopivaa keskiarvon keilaa ei ollut tavarantoimittajalla, joten arviointi jäi olemassa olevien keilojen varaan. Lämpötilan voitiin kuitenkin arvioida olleen lähellä tavoiteltua 850 celsiusastetta keilojen taipumisen perusteella (kuva 8).



Kuva 8: Keilat 013a ja 012a (kuva: Lara Jasim)

### 6.3. Polttolämpö 800 °C

Viimeinen poltto nostettiin 800 celsiusasteeseen. Saadut koekappaleet eivät tuoneet yllätyksiä ennakkoletukseen siitä, että kappaleet olisivat sintraantuneet vähemmän kuin ylimmän - ja enemmän kuin alimman lämpöalueen kokeissa (kuva 9).

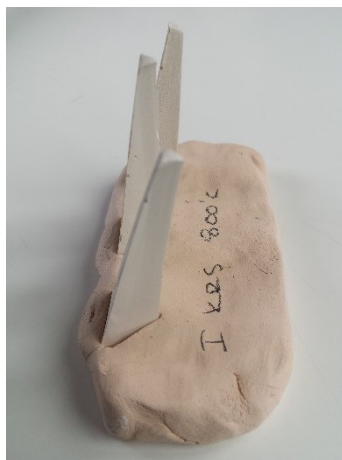
Huomattavaa viimeisessä koepoltossa oli, että vasta kyseiseen polttoon laitettiin polttokeilat (015a, SS016 ja 013a) molempiin uunikerrokseen lämpöeron todentamiseksi. Alemmassa kerroksessa olleet keilat eivät olleet taipuneet ollenkaan, kun taas yläkerroksen keilat näyttivät kaatuneen kohtalaisen tavoitellusti (kuvat 10 ja 11).

Ensimmäisen ja toisen kerroksen todennetuista lämpötilaeroista huolimatta viimeisessä poltossa on havaittavissa samat tulokset kuin korkeimmassa koepoltossa wollastoniitti- ja kvartsisarjojen ollen silmämääräisesti hyväksyttävämmän näköisiä.





Kuva 9: Koekappaleet 800 °C (kuva: Lara Jasim)



Kuva 10 ja 11: Keilat 015a, SS016 ja 013a (kuva: Lara Jasim)

## 7. Johtopäätökset

Suurimmaksi tutkimuksen kysymystenherättäjäksi nousi viimeisessä poltossa havaitut erot toteutuneissa polttolämpötiloissa. Kuinka luotettavia havaintoja kolmen polton tuloksista on muodostettavissa, kun kaikki alimmassa kerroksessa olleet koekappaleet ovat luultavasti jääneet alipolttoisiksi toisen kerroksen kappaleisiin verrattuna? Selkeimmin tämä on havaittavissa ensimmäisen 750 °C polton kvartsisarjan 0,1-0,2mm koekappaleesta, jonka sintraantuminen oli jäänyt heikoksi. Ilman polttokeiloja kyseisen päätelmän tekeminen olisi ollut mahdotonta ja asettanut kyseenalaiseksi loputkin johtopäätökset.

Jos kuitenkin verrataan kaikkia 2. kerroksessa olleita kappaleita keskenään, jäljelle jää puolet kaikista koetuloksista. Tämän avulla on mahdollista todistaa eri tukiaineiden vaikutusta erilaisten hiukkaskokojen ja – muotojen kohdalla. Vahvistettavissa on esimerkiksi alkuasetelman hypoteesi siitä, että suurempikokoinen lasipartikkelimurska <0,5mm muodostaa puhtaamman ja kirkkaamman väristä lasia kuin verrokkinsa lasikuula 0,1-0,2mm.

Havaittavissa on, että wollastoniitti tukiaineena jää kaikista vähiten kiinni koekappaleisiin ja kannustaa jatkotutkimaan sen käyttöä varsinaisessa 3D-tulostusvaiheessa. Näin ollen tutkimusta kannattaa jatkaa yhdistelmällä wollastoniitti – lasimurska <0,2 - <0,5 riippuen 3D-tulostimen teknisistä ominaisuuksista, mm. suuttimen koosta.

Ainakin uunin ylemmällä tasolla koepoltoissa saavutettiin tavoitellut lämpötilat 750–850 °C, kuten keiloista oli pääteltävissä. Keiloista ja koekappaleiden laadusta voi päätellä, että ihannelämpötila löytynee 750–800 °C väliltä. Tarkkaa lämpötilaa voisi tutkia kymmenien celsiusasteiden eroilla. Kysymykseksi jää, kuinka tukiaineen säätäminen (esimerkiksi valmistamalla seos useammasta raaka-aineesta) ja tiukempi pakkaaminen koekappaleen ympärille vaikuttaisivat lämpötilaan tukimuotin sisällä ja siten kappaleen sintraantumiseen.

Yhtenä kehityssuuntana voisi pitää samotin tarttumista koekappaleen pintaan ja sulamisesta aiheutuvan ryppyisen pinnan tutkimista. Tutkimuksen aikana epäiltiin devitrifikaatiota, mutta koska riittävästi toistoa kokeista ei saatu, tulokset jäivät toistaiseksi varmentamatta.

Tutkimustuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että kyseessä on alustavaa tietoa tuottanut esitutkimus. Tutkimuskysymystä jouduttiin asettelemaan uudestaan Otaniemessä sijaitsevan 3D-tulostimen asennuksen aiheuttaman viivästyksen takia. On myös muistettava, että digitaaliseen lopputulokseen tähtäävän tutkimustyön kokeita simuloitiin analogisin keinoin.



## Lähteet

**Fenton, D. Kervin, J.** 2000. Pâte de Verre and Kiln casting of Glass. Livermore, California: GlassWear Studios

**Kekäläinen, P.** 1992. Esineitä lasimurskasta, Pâte de verre-lasivalmistustekniikka. Taideteollinen korkeakoulu, Opetushallitus. Helsinki: VAPK-kustannus.

**Taiviola, K.** 2015. Opetusmateriaali. Materiaalitutkimus MUO-C3012. Helsinki: Aalto-yliopiston taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu

## Internetlähteet:

1) <http://firpa.fi/html/sanasto.html> (luettu 2.4.2015)

2) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221910002086> (luettu 30.3.2015)

3) <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.200800179/abstract> (luettu 30.3.2015)

4) <http://www.shapeways.com/blog/archives/401-you-can-now-3D-print-in-glass-with-Shapeways.html>  
(luettu 1.4.2015)

**Materiaalitutkimus 2015 / 25.3.2015 / K. Taiviola**

Lara Jasim & Tuuli Saarelainen, esitutkimus lasin 3d-tulostustekniikan kehittämiseksi

**Uuni-ohjelmat lasin sintraustesteihin:**

<b>1. sintrauspoltto 750 °C</b>		
<b>Lämmönnostonopeus (°C/t)</b>	<b>Tavoitelämpötila (°C)</b>	<b>Haudutus (min.)</b>
50 °C/t	300°C	-
150°C/t	600°C	-
ASAP.	750°C	5 min.
250°C/t	480°C	60 min.
10°C/t	470°C	-
70°C/t	50°C	-

<b>2. sintrauspoltto 800 °C</b>		
<b>Lämmönnostonopeus (°C/t)</b>	<b>Tavoitelämpötila (°C)</b>	<b>Haudutus (min.)</b>
50 °C/t	300°C	-
150°C/t	600°C	-
ASAP.	800°C	5 min.
250°C/t	480°C	60 min.
10°C/t	470°C	-
70°C/t	50°C	-

Liite 1b.

<b>3. sintrauspoltto 850 °C</b>		
<b>Lämmönnostonopeus (°C/t)</b>	<b>Tavoitelämpötila (°C)</b>	<b>Haudutus (min.)</b>
50 °C/t	300°C	-
150°C/t	600°C	-
ASAP.	850°C	5 min.
250°C/t	480°C	60 min.
10°C/t	470°C	-
70°C/t	50°C	-

Ed. ohjelmat muunnettu ARTSin lasipajan UNIT3:lle:

**sintrauspoltto 750 °C** (keilat: 015a-016-017)

<b>Lämmönnostonopeus (°C/t)</b>	<b>Tavoitelämpötila (°C)</b>
6t	300°C
8t	600°C
9t	750°C
9,05t	750°C
10,05t	480°C
11,05t	470°C
17,05t	50°C

Liite 1c.

**sintrauspoltto 800 °C** (keilat: 015a-SS016-013a)

<b>Lämmönnostonopeus (°C/t)</b>	<b>Tavoitelämpötila (°C)</b>
6t	300°C
8t	600°C
9,15t	800°C
9,20t	800°C
10,35t	480°C
11,35t	470°C
17,35t	50°C

**sintrauspoltto 850 °C** (keilat: 013a-012a)

<b>Lämmönnostonopeus (°C/t)</b>	<b>Tavoitelämpötila (°C)</b>
6t	300°C
8t	600°C
9,40t	850°C
9,45t	850°C
11,25t	480°C
12,25t	470°C
17,25t	50°C